

1998年美国总统克林顿和夫人来华访问时,与各界人士在上海图书馆举行了座谈会,还特邀请谢希德参加.她在改善中美关系方面发挥了一些外交官所不能起到的作用.谢希德团结各界人士、国际友人、海外学子和侨胞,为振兴中华、建设祖国作出了重大贡献.

11 光辉永存

谢希德是一位出色的社会活动家.她历任中国共产党第十二、十三届中央委员,第八、九届中国人民政治协商会议全国委员会常务委员,第七届中国人民政治协商会议上海市委员会主席,党组书记,上海市第三届科学技术协会主席等职.她于1977年12月获上海市先进科技教育工作者称号,1979、1980年两次荣获全国“三八”红旗手称号.

1998年3月,谢希德先生在参加完了美国物理学会三月会议后,身感不适.由于工作繁忙,未能做仔细地检查.1998年6月被医生确诊为乳腺癌晚期,7月份做了手术,并施行化疗和放疗.在谢先生住院的一年多时间里,她从未停止过工作.她与国外仍天天有电子邮件来往,每天处理大量文件,修改研

究生和青年教师的论文,帮助写推荐材料,为青少年的科普读物写作,接受媒体采访等等.在她病情相对稳定的短暂出院期间,还不顾劳累出席上海市政协会议、中国科学院数学学部全体会议,主持上海市欧美同学会理事会等.1999年12月谢先生的病情急剧恶化,医院采用各种抢救措施,未能使病情好转.在患病的最后两个多月中,谢先生以她惊人的毅力、顽强的斗志同超乎寻常的巨大痛苦做抗争,医务人员都深受感动而流泪,说从未看到过这么坚强的病人.2000年3月4日的晚上,她静静地走了.

在谢希德先生逝世后的讣告中,党和人民给予她高度评价:“中国共产党优秀党员,忠诚的共产主义战士,著名物理学家、教育家,”“我国半导体物理学的开拓者之一,我国表面物理学的先驱者和奠基人.”“谢希德同志的一生,是忠于党、忠于祖国、忠于人民的一生,是崇尚实践、追求真理、献身科学与教育事业的一生,是廉洁奉公、淡泊名利、无私奉献的一生.她虚怀若谷,治学严谨,乐于助人,以崇高的人格魅力和对事业的执着追求,在社会各界享有崇高的威望.”这样的评价谢先生是当之无愧的,她永远值得我们尊敬和怀念.

威耳逊的临界点相变的重正化群理论*

崔家岭

(首都师范大学物理系 北京 100037)

摘要 临界现象的研究进展缓慢,60年代实验方面的发展使人们相继建立了几个标度理论及普适性理论,并提出了标度变换概念.威耳逊一直从事量子场论的研究,对相变理论也很关注,对这些唯象理论不满.他把量子场论中的重正化群概念应用到相变理论中,并运用标度律和普适性概念,建立了临界点的重正化群理论,提供了研究临界点现象的系统方法.

关键词 相变,临界点,重正化群,关联长度,标度律

WILSON'S RENORMALIZATION GROUP THEORY FOR CRITICAL PHENOMENA

CUI Jia-Ling

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037)

Abstract The study of critical phenomena has progressed slowly. Experiments in 1960s led to the formulation of scaling laws and universality. While K. G. Wilson was studying quantum field theory, he was also interested in phase transitions but he was not satisfied with these representative theories so he applied renormalization group concepts of quantum field theory to phase transitions. In addition to implementing the concepts of scaling laws and universality, he developed a renormalization group theory for critical phenomena, which is the only sys-

* 1999 - 05 - 31 收到初稿,2000 - 01 - 17 修回

tematic approach in this field.

Key words phase transition, critical point, renormalization-group, correlation length, scaling law

1982年的诺贝尔物理奖授予威耳逊(Kenneth G. Wilson),表彰他成功地把重正化群理论应用于临界点现象,给出了临界点现象的描述和定量计算的理论.这一理论是如何发展起来的,它与标度律的关系又是如何呢?

1 相变理论和标度理论的发展过程

相变是自然界广泛存在的突变现象,人们对于相变的研究却开始得很晚.1869年,安居斯(T. Andrews)提出临界点概念标志着这一研究的开端.他还给出CO₂的PV相变图.1873年,范德瓦耳斯(van der Waals)用修正后理想气体方程对气液相变进行了理论描述,他还讨论了临界点问题.1895年,皮埃尔·居里(Pierre Curie)指出铁磁相变与气液相变的相似性.1907年,外斯(Pierre Weiss)提出描绘顺磁-铁磁相变的平均场理论.1937年,朗道(L. D. Landau)提出二级相变理论,范德瓦耳斯和外斯的理论都是朗道平均场理论的特殊情况.1944年,昂萨格(L. Onsager)求得二维伊辛(E. Ising)模型的严格解析解.昂萨格的工作表明,从体系没有奇异性的哈密顿量出发,在热力学极限下能够导致热力学函数在临界点附近的奇异行为.这就揭示了朗道理论的缺陷:在相变点,比热不是不连续,而是对数发散^[1].其实,在1900年以前,人们就发现一些实验结果与平均场理论并不相符,例如,临界指数 β 更接近1/3而不是平均理论的1/2^[2].在50年代,杜姆(C. Domb),萨肯斯(M. Sykes)和费舍(M. Fisher)把高温级数展开(high-temperature series expansion)推到高次,研究了临界相变的三维简单模型,并用外推法得到了临界指数.他们的临界指数与平均场理论不同却与实验结果相符^[2].60年代实验方面的巨大进展为临界指数的确定提供了大量新的数据,从而为在理论研究上超越平均场理论提供了实验基础.

60年代中期,人们通过对实验数据的分析建立起标度理论.标度理论通过标度假设,得出标度律,即临界指数之间的关系.标度假设的基本思想是,在临界点的邻域内,关联长度 ξ (表征涨落关联的空间范围的物理量)变得很大;当趋于临界点时, ξ 趋于无穷;一切有限大小的体系的微观特征长度(如晶格常数)都不再对体系的热力学行为有影响,唯一起作用的特征长度是关联长度 ξ .这就是说,在临界

点,一切热力学量的奇异性均来源于 ξ 的奇异性.1963年,费舍提出他的标度理论.他认为在临界点的邻域内,关联函数 $C(k)$ 的渐近形式为 $\xi^d g(k\xi)$, $C(k)$ 是密度-密度关联函数 $C(r, r')$ 的傅里叶展开的平面波的系数,即平面波的振幅,通常也称为关联函数, k 是平面波的波矢.由此出发,可以得到 $\nu = 1/(2 - \eta)$.这就是费舍标度律.费舍是建立标度理论的先锋,他在理论分析支持下的对实验数据的分析标志着标度理论的开始^[3].

1945年,维东(B. Widom)提出自己的标度律.他在研究铁磁相变问题时,将自由能 f 分成正常部分和奇异部分,即 $f = f_n + f_s$,临界点的邻域内热力学的奇异性来自自由能的奇异部分 f_s .维东假定 f_s (以后写为 f)即具有下面的形式:

$$f(\mathcal{N}t, \mathcal{N}h) = \lambda f(t, h),$$

$$t \equiv (T - T_c)/T_c, \quad h \equiv \mu B/(k_B T_c).$$

这实际是假定 f 是 t, h 的广义齐次函数.纯粹利用热力学可以将临界指数 $\alpha, \beta, \nu, \delta$ 用标度幂 p, q 表出:

$$\alpha \equiv (2p - 1)/p,$$

$$\beta \equiv (1 - q)/p,$$

$$\nu \equiv (2q - 1)/p,$$

$$\delta \equiv q/(1 - q).$$

上述四个指数之间的关系为

$$\alpha + 2\beta + \nu = 2,$$

$$\nu = \beta(\delta - 1).$$

这就是维东标度或罗斯布鲁克(Rushbrooke)标度律.约瑟夫森(Josephson)也得到以他的名字命名的标度律: $\alpha = 2 - \nu d$.

1966年,卡达诺夫(Kadanoff)提出标度变换概念,试图从微观上论证标度假设.卡达诺夫分析了关联函数和关联长度在标度变换下的变化形式,导出了费舍和约瑟夫森标度律.1965年,维东提出标度律(scaling)及热力学函数为齐次函数的概念,即改变临界温度和其他变量的偏离的尺度,临界点邻域内的相变行为不变.卡达诺夫提出,靠近临界点,改变长度尺度,有效哈密顿量的形式保持不变.他认为这种长度尺度下的物质集团组成的体系与原来尺度下的物质集团组成的体系的相变行为相同,只是磁场强度和临界点的温度需要重新标定.他还把这种不变性推广到了关联长度的行为和关联函数的行为

上.

普适性是由古瑞夫斯(Robert Criffiths)根据实验数据提出来的假设发展起来的.普适性是说,只由空间维数和序参量维数决定体系的临界行为^[1].

2 相变的重正化群理论的建立

重正化理论是在量子场论中为了处理物理量的无穷大问题而发展起来的,后来发展成为重正化群理论.威耳逊一直研究量子场论问题,对量子场论非常熟悉.他在处理相变问题的时候认识到了重正化群理论与临界点现象的相似性,他对重正化群理论作了发展,然后用来处理临界点现象,取得成功.

2.1 重正化群理论的建立和威耳逊在这一领域的工作

30年代,狄拉克、费米、海森伯、约丹(E. P. Jordan)、维格纳(E. P. Wigner)等人初步发展了量子电动力学.量子电动力学的拉格朗日函数包含两个量:裸电荷 e_0 、裸质量 m_0 .由于电子和质子都有复杂的结构,人们却把它们当成点来处理,因此,实验测得的电子电荷 e 和电子质量 m 不是 e_0 和 m_0 ,而是它们的幂级数展开,只有第一级展开才有 $e = e_0, m = m_0$.但不幸的是,展开式中的高阶项是无限大的,因为动量积分在大动量极限时是发散的.这种结果是没有物理意义的.重正化理论表明,如果把拉格朗日函数中的参数 e_0 和 m_0 换成实验测得的量 e 和 m ,同时重新标度电子和拉格朗日函数中出现的电磁场,以确保可观察量的矩阵元,特别是电磁场的矩阵元都是有限的,那么量子电动力学的发散问题就能消除.除了上述方法以外,还有许多其他重新确定参数的方法,可以消除量子电动力学的发散性.人们发现这些不同的重新确定参数的方法可以被定义为转换群,这就是重正化群.1954年,盖尔曼(Murray Gell-Mann)等人研究了确定参数方法的多样性和与之相关联的重正化群.他们认为由经典实验方法测得的电量 e 是量子电动力学的极大长程下的行为特性.他们的研究表明,可以引入可供选择的参数族,其中的每个参数 e_λ 都可以用来代换 e_0 .参数 e_λ 只与任意动量标度 λ 下的量子电动力学的行为有关,而不是与测量时的小动量相关.动量标度 λ 对于量子电动力学犹如关联长度 ξ 对于临界点现象. e_λ 组成的参数族把测量电荷 e 和裸露电荷 e_0 联成一个序列.这个序列在小动量下的极限是 e ,在大动量下的极限是 e_0 .他们发现 e_λ^2 遵循下面的微分方程:

$$\lambda^2 d(e_\lambda^2)/d(\lambda^2) = \phi(e_\lambda^2, m^2/\lambda^2),$$

函数 ϕ 的幂级数的展开式的系数不是发散的且与 λ 的值无关.他们的重要发现是,由方程的解可以推断出当 e_0 幂级数展开时,测量电荷 e 将出现发散.更一般地说,如果用 e_λ 的幂级数的形式展开 e ,高阶项系数包含 $\ln(\lambda/\lambda^2)$ 的幂,如果 λ 或 λ' 变成无限大,就会导致系数发散,当 λ/λ^2 很大或很小时,这些系数就非常小.他们认为,由给出的微分方程出发可以断定, e_0 是一个定值而且与 e 的值无关,这个定值可以是有限的,也可以是无限的.

威耳逊一直在研究量子场论问题,1961年前后,他把用费曼图分析大动量的结果应用到定源模型上.他意识到如果用动量带代替动量空间中的动量连续面,可以使定源模型得到简化,所得结果也会更加清晰.他舍弃了所用的动量,只留下一些分开的带,这些动量带的大小如下:

$$1 \leq |K| \leq 2, \Lambda \leq |K| \leq 2\Lambda, \Lambda^2 \leq |K| \leq 2\Lambda^2, \dots, \Lambda^n \leq |K| \leq 2\Lambda^n, \Lambda \text{ 是大数.}$$

这一模型可以用微扰论来处理.这一方法不同于场论中以前所用的传统方法,每一个能带的能量跨度都是不同的,第 n 条带的能量跨度为 Λ^n .下面的步骤就是把最大的动量带作为未受扰动的哈密顿量,而把其余的动量带作为微扰.每个带中的哈密顿量都包含有自由介子能和相互作用能两部分,因此这种新的微扰法既不是强耦合微扰也不是弱耦合微扰.威耳逊证明这种微扰法的优越性在于,从动量带出发,选择未受微扰的基态,可以得到 $n-1$ 个动量带的有效哈密顿量.这个新的哈密顿量同原来的哈密顿量相似,只有 $n-1$ 个动量带被保留下来,但是介子-核的耦合常数被重正化了.这种重正化与第 n 条带的哈密顿量的基态的非平庸矩阵元有关.这一工作是一个突破,他为重正化群理论找到了自然而然的基础,即消除问题中的高能量.

威耳逊听了亥普(K. Hepp)等人报告他们公理化场论的工作,认为应该用坐标空间来处理问题.他把过去用大动量费曼图处理的工作转换到坐标空间中,得到了量子场算符点积的短程展开.他提出了上述方法的一套规则,并认为伊辛模型的解法可能就是这种方法的证明.在60年代他教过几次量子力学,对于量子力学处理问题的过程印象很深.第一步是利用不确定原理降低能量进行定性分析,第二步则是利用第一步得到的波函数进行变分计算,最后一步是利用计算机进行数值计算,得到高度精确的结果.他认为场论问题也要遵循这一过程.

ϕ 场的哈密顿量的动能部分只有在傅里叶系
物理

数 ϕ_k 的表象中才是对角化的,同时 ϕ 只有在 $\phi(x)$ 的表象中才是对角化的.于是,他就开始寻找一个折衷的表象,在其中动量和相互作用能都能实现基本的对角化.他需要用波函数把场量 $\phi(x)$ 展开,而波函数在动量空间中和坐标空间中都占据最小的体积.不确定原理指出这就是 1 个单位体积,相空间就被分成了单位体积的集团.动量分析表明,动量空间应该用对数跨度划分,也就是每个动量空间的体积对应着一个壳,就象先前定义动量带一样,但是不能落在一些特殊的动量范围(它们是 $1 < |K| < 2$, $2 < |K| < 4$, 等).由于转换不变性,坐标空间中的集团与给定的动量壳占据同样的大小.由此就定义了集团的一个格子.不同的动量壳对应坐标空间中不同大小的集团.

这一体系的哈密顿量的低能部分是高能部分的微扰,但计算过程太复杂,他的分析过程也很粗糙,连高能相对论性粒子部分都分辨不出来,而这应该体现在场的哈密顿量之中.从这一图像中,他意识到哈密顿量在大的但不是无限的值上断开.而哈密顿量一旦断开就可以用格论来处理.对于最大的动量尺度,每一个格子对应着坐标空间中的集团.格论中最重要的一步就是确定覆盖所有断开的动量空间的相空间小室.它们在坐标空间中形成一套集团,它们反过来又确定了坐标空间中的格子,场量 ϕ 被格子所确定.他由此认为场论必须从格子上来理解.

2.2 威耳逊对临界现象的研究

在他去阿斯本(Aspen)之前,威耳逊参加了康乃尔大学的一个讨论班.在讨论中,维东提出了态的标度方程,由于威耳逊对临界点现象研究的状况所知甚少,因而对维东给出的形式缺乏理论基础的状况不满意.在一些论文的影响下,他意识到在相变研究中可以应用重正化群理论.在阿斯本他和一些固体物理学家讨论了这一想法,得知卡达诺夫等人在这一个问题上有所进展.

卡达诺夫的想法是,在临界点附近,人们可以处理磁矩的集团,它们的行为可以用一个单一的等效磁矩来表示,这些等效磁矩和初始的简单模型一样有近邻相互作用,但有效温度和外加磁场会和原来的有所不同.等效磁矩在 L 的原子尺度的空间范围内都会存在,而 L 是任意的.卡达诺夫认为存在依赖于 L 的温度和场变量 T_L, h_L , 并且 T_{2L}, h_{2L} 是 T_L 和 h_L 的解析函数;在临界点 T_L 和 h_L 的行为独立于 L 的值.从这些假设出发,卡达诺夫得出了维东和费舍等人的标度律.

威耳逊把格子化场论和临界点现象联系起来.他对几何量子场论和统计力学的变换矩阵方法有所了解以后,发现二者在临界点附近存在相似性.他知道场论必须是相对论形式的,相对应的统计力学理论必然有一个大的关联长度.他研究了一些强耦合近似到 ϕ^4 场理论的论文,发现忽略了重正化的效果,当这些效果被记入的时候,强耦合近似就不像原来那样简单了.威耳逊想要把卡达诺夫的标度理论的引申含义应用到量子场论中,斯芮盈模型解法的标度不变性和一些关于量子场论中标度不变性的讨论证实了标度不变性在场论中是适用的,至少在短程上如此;但对应着临界点现象的非零系数,场算符会有非零的标度维数.1969年,威耳逊在标度观念的基础上重建了其理论的短程展开,尽管他的结果同短程行为的主要实验结论不符,但他并不担心.他重新回到定源理论和动量的带近似,并在模型上做了进一步简化.由于在真实情况下,动量带划分因数 A 为 2,连续能量标度的比率 $1/A$ 就是 $1/2$.当低的能量标度被当成高的能量标度的微扰来处理时,就会产生一个无限复杂的有效哈密顿量和一套无限多的耦合常数.每进行一次微扰处理就可以消去一个能量标度,同时产生一个复杂的哈密顿量和一套无限多的耦合常数.尽管如此,他发现,对于足够大的 A ,可以精确地控制产生的有效哈密顿量;尽管耦合常数无限多,他证明,高能量标度微扰处理对于有效哈密顿量的影响是有限的,而且是非常小的,即使进行任意多重迭代以后仍然如此.这一结论使他认识到重正化群转换尽管产生了很多的耦合常数才能消去一个能量标度,但这并不是一件坏事.不动点的重正化群表示也是合理的,并且只有数量极少的耦合对于转换的定性行为非常重要,其余的耦合对于定量计算才是重要的.这就是说,耦合的重要性级别是不同的,对于给定的精确度,只有有限的耦合才是必须的.在他的模型中,耦合重要性的级别是由 $1/A$ 的幂次决定的.他认识到在格子的相互作用中,特别是伊辛模型,局域性提供了重要性的级别,即在一些体积有限的格子中,只存在有限数目的伊辛自旋相互作用.他把卡达诺夫的伊辛模型的近邻耦合进行了重新表述:最近邻耦合最重要,但其他耦合也会出现在集团的有效哈密顿量中.

威耳逊原来熟悉的重正化群变换只有固定数目的耦合,在盖尔曼等人的理论中只有电量 e_A ,卡达诺夫理论中只有有效温度和外场.威耳逊试图为这些数目固定的耦合找到更多的变换,但没有成功.他

发现定义重正化群的变换是容易的,一些重正化群的变换早已存在,困难的是找到对这些变换进行可实际计算的近似方法.

1970年秋,维东邀请威耳逊在他的统计力学讨论班上介绍重正化群理论.凯斯阼(Di Castro)等人提出把场论的重正化群理论应用到临界现象中.威耳逊在关于不动点的讲演中给出了一个可计算的例子,他把相空间的格分析应用到临界点的朗道-京茨堡模型上,并简化到可计算的地步,虽不精确但保留了相空间图像的本质.他得到了一个单变量函数的非线性积分变换,可以在计算机上用迭代法求解.通过计算,他从迭代表述中得到了系数,并证明它有不动点,并由此推出了维东标度,可以说是对他理论的有力证明.

3 结论

如果参数空间中的一个点在尺度变换下不变,则称这一点为这一变换下的不动点.如果一个体系原来不处于临界点,其关联长度是有限的,经过一次重正化变换,关联长度变小,体系则远离临界点;如果体系原来处于临界点,关联长度无限大,重正化变

换后,体系仍处于临界点.这样,威耳逊很自然地将临界点和不动点对应起来,通过求不动点就可以求得临界点,进而可以计算全部临界指数.重正化群理论有别于传统的统计物理方法:传统的统计物理是通过系统理论的普遍公式直接计算配分函数;重正化群理论不是去直接计算配分函数,其基本思想是:在临界点关联长度趋于无穷大,体系应具有尺度变换下的不变性,因此只需寻找尺度变换下的不变性,从而确定临界点并计算临界指数^[1].

重正化群理论只是一种近似的方法,并不能从根本上解决临界指数发散的困难,但它是目前较好的处理临界点现象的方法.由于它仍然是从系统理论的普遍公式出发来计算临界指数的,因此它仍然是微观的方法.

参 考 文 献

- [1] 北京大学物理系《量子统计物理学》编写组.量子统计物理学.北京:北京大学出版社,1996.312—461[Author Group of Quantum Statistical Physics of Department of Physics of Peking University. Quantum Statistical Physics. Beijing: Peking University Press, 1996.312—461(in Chinese)]
- [2] Wilson K G, Rev. Mod. Phys., 1983, 55: 583
- [3] Physics Today, 1982, 35(12): 17

奥古斯特·孔脱:第一流的实验物理学家*

罗 平

(中国科学技术大学科学史与科技考古系 合肥 230026)

摘 要 奥古斯特·孔脱是19世纪德国第一流的实验物理学家.他首创测量声速的方法;首测单原子气体的热容比,并最早发现了气体的法拉第效应等.在声学、光学和气体动力学实验研究方面作出了诸多重要贡献,创造了许多卓有成效的实验方法.文章就孔脱的生平、业绩、学术思想等作了较为全面的评介.

关键词 孔脱,实验物理学,声速测量,热容比

AUGUST KUNDT: A LEADING EXPERIMENTAL PHYSICIST

LUO Ping

(Department of Scientific History and Archaeometry, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract August Kundt was a leading experimental physicist in Germany during the last half of the nineteenth century. He created the method to measure the velocity of sound, and was the first to measure the specific heat of monatomic gases and to discover the Faraday Effect in a gas. He made many important contributions to experimental research on acoustics, optics and gas dynamics, and invented many effective experimental methods. A review is given of Kundt's life, contributions and scholastic ideas.

Key words Kundt, experimental physicist, measuring sound velocity, specific heats

* 1999-12-13 收到初稿,2000-01-25 修回